تأثير اهتزازات الأتصال على الاستجابة الدينامية لمنظومة توربينية _ ضاغطة

د.موفق علي توفيق* عادل عبد نايف*

تاريخ التسليم : ٢٢ / ٨ /٢٠٠٢
تاريخ القبول : ١٠ /٦/ ٢٠٠٤

الخلاصة

يتناول البحث دراسة الاستجابة الدينامية للعمود الدوار الخاص بمنظومة توربينية – ضاغطة جراء التأثير الدينامي للاتصال.حيث تناول تأثير تغيير الزوايا التصميمية لدخول وخروج كل من الغاز و النصل ، وفقدان نسبة من كتلة النصل وبوجود الاهتزاز القسري على السرع الحرجة و توزيع المقادير الجانبية للاهتزاز على طول المنظومة.تمت الدراسة على منظومة توربينية– ضاغطة (FIAT) ايطالية الصنع من نوع (TG20-SN.297) تعمل حاليا في محطة الدورة لتوليد الطاقة الكهربائية .اذ تبلغ سرعتها التشغيلية (4918 r.p.m).

أخذت هذا الدراسة بنظر الاعتبار تأثير قوى القص وتأثير العزم الجايروسكوبي للنظام بأكمله، وتأثير التخميد لطبقة الزيت بالنسبة لكراسي التحميل وكذلك تأثير قوى عدم الموازنة الناتجة من وجود الاختلافات المركزية لكتل العمود الدوارة، لقد تم الاعتماد في التحليل على طريقة المصفوفات الانتقالية فقد طورت هذه الطريقة بتطبيقها على نظام معقد (نموذج للانظمة ذات التفرعات العديدة الملتقية في موقع واحد)، حيث اعتمدت على المبادئ الأساسية لتصميم التوربين الغازي في حساب القوة المسلطة على طول سطح النصل من خلال حساب السرع التدويمية والمحورية باستخدام مخطط السرع لدخول وخروج الغاز ولمرحلة واحدة فقط.

أظهرت النتائج أن وجود الاضطراب المفاجئ في المنظومة والناتج من خسارة جزء من كتلة إحدى الأتصال يؤدي الى حدوث زيادة واضحة في قيم السرع الحرجة وكذلك في قيم سعة الاهتزاز عند مراتب تلك السرع . كما يلاحظ عدم تغير في قيم وعند مراتب السرع الحرجة بتغير الزوايا التصميمية لدخول وخروج كل من الغاز والنصل بينما قيم سعات الاهتزاز تزداد بشكل واضح عند تغير قيم هذه الزوايا .

Effect of Blades Vibration on the Dynamic Response of Turbo-Compressor System

Abstract

The research studies the effect of the blade vibration on the dynamic response of turbo-compressor rotor system. The design angles for the blades, gas entrance and exits and the missing of a fraction of blade mass have been studied with the existence of the forced vibration. The critical speeds and the eigen modes have been computed taking into account the effect of the cited factors.

Shear effect, gyroscopic effect, bearing damping and the unbalance forces are catered for the analysis of the system has been achieved using the transfer matrix method. The transfer matrices are developed to consider the complex system pattern which is composed of many branches meeting in point located on the system rotor, which represents a disk stage.

The basic principles for designing the gas turbine have been adopted in calculating the subjecting forces of the gas along the blade surface using the triangle velocities diagram for the gas inlet and exist for each single stage.

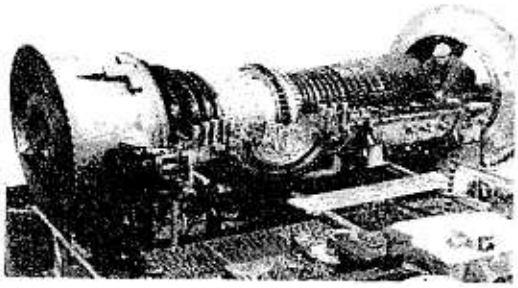
The results show clearly when the system looses a part or fraction of any blade, a sudden disturbance is noticed . An increase in the critical speed and the amplitudes of vibration are revealed . An effect of the gas and blade angles change on the critical speeds values and orders are noticed. The effect is only confined on the amplitude of vibration.

* قسم هندسة الميكانك والمعدات / الجامعة التكنولوجية

https://doi.org/10.30684/etj.24.1A.14
2412-0758/University of Technology-Iraq, Baghdad, Iraq
This is an open access article under the CC BY 4.0 license http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

المقدمة:

تستخدم الأعمدة الدوارة في المكائن الصناعية مثل التوربينات البخارية والغازية والمولدات التوربينية (Turbogenerator) ومحركات الاحتراق الداخلي، والضواغط المحورية والترددية لنقل الطاقة (Power Transmission) وغيرها ، وبسبب الطلب المتزايد لنقل الطاقة تظهر أهمية هذا الحقل الهندسي من خلال الحصول على مكائن ذات كفاءة عالية وأقتصادية في نفس الوقت ولتحقيق هذه الأهداف فقد ظهرت مشاكل عديدة في تصميم المنظومات التوربينية التي تتعرض التوربينات ذات الجريان المحوري فيها الى أجهادات عالية على النصل بسبب ارتفاع كمية الشغل المطلوب وكذلك ارتفاع درجات الحرارة والتي من الممكن مواجهتها للوصول الى الحلول المثلى لتجاوز الصعوبات في حل المشكلة ولأقرار التصاميم الكفوءة لذلك تم دراسة السلوك الديناميي لمنظومة غازية ذات مراحل متعددة والموضحة في شكل (1).



شكل (1) نموذج في مقطع منظومة غازية ذات المراحل المتعددة

البحوث السابقة

تم بحث تأثير القوة الطاردة المركزية على سرع تردد الذبذبات الطبيعية نظريا وعمليا من قبل **الباحث [1] (Saleh, 1979)** باستخدام العتبة الكابولية المكافئة لنصل مجوف وقد مثل هذا التأثير بعلاقة تعبر عن التغير في سرع التردد أثناء الدوران واستخدمت هذه العلاقة أثناء أيجاد أشكال الأطوار الاهتزازية.وتوصل إلى أن سرع التوربين لها تأثير في زيادة سرع تردد الذبذبات الطبيعية ونقصان في سعة الإزاحة العرضية.

أما فيما يخص الاهتزاز في الضاغط فقد قام **الباحث [2] (Fabunmi, 1980)** باستخدام طريقة شبه تجريبية (Semi-Empirical) بالاعتماد على أشكال الطور التي تم الحصول عليها تجريبياً لغرض دراسة استجابة اهتزاز العمود الدوار لضاغط محوري ذو (23) نصل وتعيين أشكال الأطوار للمنظومة بواسطة استخدام قيم انحرافات النصل عند حصول الرنين بالاعتماد على عملية تقريب ترددات المنظومة إلى اقرب ترددات تم الحصول عليها من نصل مثبت من طرف واحد (Blade Cantilever).

وتوصل الباحث إلى عدد من الاستنتاجات أهمها أن مجموعة القرص والنصل المثبت فيه تظهر بعض الاستجابات الرنينية عند مدى محدود من الترددات، حيث لوحظ أنه عند ترددات معينة أقل من الترددات الرنينية للنظام فأن زاوية الطور لكل نصل سوف تتبع مباشرة زاوية الدالة القسرية (Forcing Function). بينما عندما تكون الترددات أعلى من الترددات الرنينية للنظام، فأن زاوية الطور لكل نصل تكون متأخرة بـ (180) درجة عن زاوية الدالة القسرية. أما إذا كانت الترددات من ضمن الترددات الرنينية للنظام فانه لايمكن ربط زاوية الطور بالأنصال مع زاوية الطور للدالة القسرية، وتم مواصلة دراسة تحليل الاستجابة الوقتية للعمود الدوار حيث قام الباحثون **[3] (Sakata et. al.,1983)**، بدراسة تأثيرات الحمل الصدمي والاهتزازات لعمود دوار ذو وزن خفيف ودراسة السرعة العالية التي تنشأ من خسارة إحدى الأنصال.ولاحظ عند ظهور زيادة مفاجئة لحالة عدم الاتزان فأن قيمة أقصى سعة للاهتزاز تزداد مع زيادة مرونة القرص.

قام الباحث **[4] (Kaushal,1992)** بدراسة السلوك الديناميي لنظام محمل-عمود دوار- قرص ذو أنصال (Bladed Disk-Turborotor-Bearing System) وهذا النظام يتكون من عدة أنظمة ثانوية (القرص التوربيني، الأنصال، المحامل، والركائز الساندة).وتم دراسة الاهتزاز على الأنظمة الثانوية المنفذة باستخدام طريقة (Rayleigh-Ritz Method) والتي تفرض شكل الدوال(Shape Function) ذات الحدود المتعددة. ثم جمع الأنظمة الثانوية باستخدام طريقة العناصر المحددة، حيث تم حساب الترددات الطبيعية وشكل النسق والتي تم الحصول عليها من خلال تغير السرع الدورانية، وكذلك تم حساب سعة الاهتزاز والاجهادات الناتجة بسبب القوة الطاردة المركزية والقوى التوافقية (Harmonic Force) المسلطة على النصل والقرص.واستنتج أن القوة الطاردة المركزية هي العامل الرئيسي لتحديد الإجهاد الحرج بالمقارنة مع قوة ضغط الغاز على نموذج النصل كحمل توافقي.

كما قام الباحثان **[5] (Rieger & Zhou, 1998)** بأجراء تحليل

رياضي وحاسوبي لحسابات معقدة لأنظمة عمود دوار-محمل والقاعدة-(Rotor-Bearing-Pedestal-Foundation System) وقد اعتمد التحليل على طريقة المصفوفات الانتقالية لـ (Prohl-Myklest) وتم استخدام ثمانية محامل مساعدة للحصول على مدارات بيضوية لحركة العمود الدوار، وهذه المحامل مركبة على أطواق مرنة وثقيلة والتي بدورها تكون مثبتة على تركيبة أساسية ذات خواص منتظمة لتوزيع الكتلة والجساءة، والقاعدة بدورها مستندة على عدد من الركائز المخمدة بصورة منتظمة.وكما درس الباحثان[6] (Rieger & Zhou) وبنفس العام إجراء تحليل رياضي للأنظمة ذات المستويات الثلاث (Three-Level Multi-Span Rotor System) المتعددة الأوساط ومن خلال هذه الدراسة تم أيجاد ظروف عدم الاستقرارية (Unstability Condition) بواسطة أيجاد القيم المميزة (Eigenvalues) لمحددة النظام، والتي تم الحصول عليها بواسطة طريقة المصفوفات الانتقالية. وقد تم حل محددة الاستقرارية (Stability Determinate) لأوطأ سرعة دورانية والتي عندها يصبح تخميد النظام مساوي للصفر، وتبنت الدراسة عمود دوار جاسئ للمحملين مخمدين مرنيين ودعائم ذات انثنائية (Flexible Support). كما تم اخذ حالة ثانية ناقشت حالة العمود الدوار ذو خاصية انثنائية مع اربعة محامل مخمدة مرنة. أما الحالة الثالثة فقد قارنت استقرارية وحدة توليد توربينية بقدرة (300Mw) ذات ستة محامل باستخدام نوعين مختلفين من المحامل.

وتوصلت الدراسة الى أنه تم الحصول على تقارب كبير بين النتائج المستحصلة من هذه الدراسة ونتائج أخرى سابقة حصل عليها هذا الباحث لقيم عتبة السرعة (Threshold Speed) وترددات التدويم،كما تم التوصل إلى أن طريقة المصفوفات الانتقالية هي طريقة كفوءة وبالإمكان الحصول على دقة مضاعفة للنتائج باستخدام القيم الذاتية المعقدة (Complex Eigenvalues).

أما البحث الحالي فقد تضمن دراسة التأثير الديناميي للأنصال المتحركة باعتبارها أنظمة متفرعة، وتأثير كل من **الاضطراب المفاجئ جراء خسارة جزء من إحدى الأنصال وكذلك تأثير الزوايا التصميمية للأنصال** على الاستجابة الدينامية للنظام وذلك باستخدام طريقة المصفوفات الانتقالية التي تأخذ بنظر الاعتبار تأثيرات قوى القص، العزوم الجايروسكوبية، تغير مساحة المقطع على طول العمود الدوار، ومعاملات المرونة والتخميد لكراسي التحميل بالإضافة الى التأثير الناتج من الأحمال الديناميكية الخارجية وقوى عدم الموازنة.

القوى والعزوم على محطات العمود الدوار

١. قوة القصور الذاتي التي تؤثر على الكتل المتمركز لمحطات العمود الدوار عند التردد الزاوي (Ω) تكون بالصيغة التالية:

$$\begin{aligned} -m\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} &= m_i\Omega^2 x \\ -m\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} &= m_i\Omega^2 y \\ -m\frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} &= m_i\Omega^2 Z \end{aligned} \quad \ldots (1)$$

٢. العزوم القصرية التي تؤثر على عزوم القصور الذاتي القطبي والمحوري عند محطات العمود الدوار وعند تردد زاوي (Ω) تكون.

$$\left.\begin{aligned} \left(M_Z^R - M_Z^L\right) &= \Omega^2 I_{ZQZ} - M_{GZ} \\ \left(M_X^R - M_X^L\right) &= -\Omega^2 I_{XQX} + \Omega^2 \Delta I_{YQ} - M_{GY} \\ \left(M_Y^R - M_Y^L\right) &= -\Omega^2 I_{YQY} - \Omega^2 \Delta I_{QX} - M_{GY} \end{aligned}\right\} \ldots (2)$$

حيث أن

$$\Delta I = \left(I_Z - I_X\right)$$

٣. قوى عدم الموازنة (U) هي القوى المتمركزة عند محطة العمود الدوار ، ومركباتها تمثل من خلال $(\bar{U}_Y)$ و $(\bar{U}_X)$ حيث أن: $\bar{U}_Y = U_Y^* \cdot e^{i\omega t}$ و $\bar{U}_X = U_X^* \cdot e^{i\omega t}$ [7] ، [8].

$$\left.\begin{aligned} \Omega^2 U_Y &= \Omega^2 U_Y^* \cos(\omega t) - \Omega^2 U_X^* \sin(\omega t) \\ \Omega^2 U_X &= \Omega^2 U_X^* \cos(\omega t) + \Omega^2 U_Y^* \sin(\omega t) \end{aligned}\right\} \ldots (3)$$

٤. قوة ردود الفعل عند مواقع كراسي التحميل ، لكل محمل تمثل بـ (8) معاملات للصلابة والتخميد. القوى المسلطة على الكرسي التحميل تكون بالصيغة التالية:

$$\left.\begin{aligned} M_J\ddot{Y} + K_{YY}(Y - Y_P) + D_{YY}(\dot{Y} - \dot{Y}_P) + K_{YX}(X - X_P) \\ + D_{YX}(\dot{X} - \dot{X}_P) - \Omega^2 U_Y - V_{GY} = \left(V_Y^R - V_Y^L\right) \\ M_J\ddot{X} + K_{XX}(X - X_P) + D_{XX}(\dot{X} - \dot{X}_P) + K_{XY}(Y - Y_P) \\ + D_{XY}(\dot{Y} - \dot{Y}_P) - \Omega^2 U_X - V_{GX} = \left(V_X^R - V_X\right) \end{aligned}\right\} \ldots (4)$$

حيث أن X_P ، Y_P تمثل أزاحات (Pedestal) ، و $(\dot{r},\dot{r}_p)$ هي سرع (Pedestal).

القوى والعزوم المسلطة على سطح النصل والناتجة من ضغط الغاز

تعرف القوة الناتجة من قوة ضغط الغاز بأنها مقدار التغير في زخم الغاز باتجاه حركة دوران الأنصال وهي كمية اتجاهية وتحسب من خلال مخطط السرع المبين في الشكل (2)، [10].

شكل(2) مخطط السرع لدخول وخروج المائع خلال مرحلة لتوربين

القوة المماسية (F_y) المسببة لدوران المنظومة والتي نحصل عليها من خلال مخطط السرع وكما يلي:

$$F_y = \dot{m}_g(C_2 SIN\alpha_2 - C_3 SIN\alpha_3) \quad \ldots (5)$$

يتعرض النصل الى قوة محورية ناتجة من انحدار الضغط على جانبي النصل والتي نحصل عليها بنفس الطريقة أعلاه.

$$F_x = \dot{m}_g(C_{a2} - C_{a3}) = \dot{m}_g(C_2 COS\alpha_2 - V_3 COS\beta_3) \quad \ldots (6)$$

يتم حساب القوى أعلاه بالاعتماد على موقع العنصر على طول النصل وعند منتصف نصف القطر ،وكذلك يمكن حساب قيم زوايا دخول وخروج لكل من الغاز والنصل ولأي موقع على طول النصل بالاعتماد على متوسط نصف القطر وفق المعادلات التالية:

$$\left.\begin{aligned}\tan\alpha_2 &= \left(\frac{r_m}{r}\right)_2 \tan\alpha_{2m}\\ \tan\alpha_3 &= \left(\frac{r_m}{r}\right)_3 \tan\alpha_{3m}\end{aligned}\right\} \quad \ldots (7)$$

$$\left.\begin{aligned}\tan\beta_2 &= \left(\frac{r_m}{r}\right)_2 \tan\alpha_{2m} - \left(\frac{r}{r_m}\right)\frac{U_m}{C_{a2}}\\ \tan\beta_3 &= \left(\frac{r_m}{r}\right)_3 \tan\alpha_{3m} + \left(\frac{r}{r_m}\right)\frac{U_m}{C_{a2}}\end{aligned}\right\} \quad \ldots (8)$$

اما العزوم الخارجية الناتجة جراء تأثير ضغط الغاز فيتم حسابها باستخدام معادلات اويلر للمكائن التوربينية (Eulers Turbomachinery Equation) التي تربط التغير في الطاقة مع التغير في الزخم ،

ـ العزم المسلط في حالة الضاغط ذو الجريان المحوري المستقر (τ_a) .

$$\tau_a = \dot{m}_g(r_e v_e - r_i v_i) \quad \ldots (9)$$

ـ العزم المسلط في حالة الجريان المستقر للتوربين (τ_o) .

$$\tau_o = \dot{m}_g(r_i v_i - r_e v_e) \quad \ldots (10)$$

النموذج ومحدداته

(The Model and Limitations)

المواصفات العامة للنموذج

١. منظومة غازية (FIAT) من نوع (TG20-SN.297) تنتج طاقة كهربائية تقدر حوالي (37MW) وتعمل بسرعة تشغيلية مقدارها (4918 r.m.p) والتي تعمل حاليا في محطة الدورة .
٢. تتكون المنظومة من ثلاث مراحل للتوربين وثماني عشر مرحلة للضاغط المحوري.
٣. كرسيين تحميل من نوع (Journal Bearing) ذات مواصفات متماثلة تسند المنظومة عند طرفيها القريبين من النهاية الحرة.
٤. يزن العمود الدوار الخاص بالمنظومة (17500 kg) وطول(6.5 m).
٥. تم تبني ثلاث نماذج من الأنصال المتحركة الخاصة بتوربين المنظومة ذات أبعاد وتصاميم مختلفة تبعا للمرحلة التي تعمل فيها وقيست عمليا بأبعادها الثلاث في المعهد المتخصص للتصاميم الهندسية.

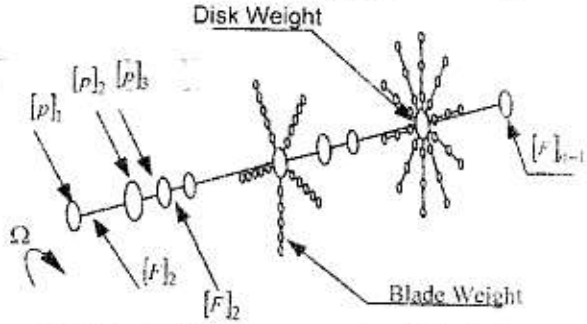
محددات النموذج (Limitations)

١. أهمال التخميد الداخلي لمعدن المنظومة.
٢. افتراض أن السلوك خطي مرن لجميع اجزاء المنظومة.
٣. وجود التشوه الحاصل من قوى القص في تحليل كل من العمود الدوار والأنصال المثبتة في قرص ذلك العمود .
٤. تمثل طبقة الزيت في كراسي التحميل بعدد مركب من الصلابة والتخميد بصورة مائلة ومستعرضة.
٥. تمثلك المنظومة عدد غير محدد من الأقراص والمحامل.
٦. كتل العمود الدوار وكتل الأقراص ذو الأنصال هي متمركزة في نقاط منفصلة ، لكن المرونة (الأنشائية) هي موزعة وفق نظرية العتبات.

٧. أي عدد من مصفوفات النقطة والمجال يمكن تطبيقها على النظام المحلل.
٨. جميع الأنصال المتحركة متماثلة.
٩. سرعة الغاز المحورية (C_a) ثابتة على طول النصل المتحرك.
١٠. السرعة التدويمية تساوي السرعة الدورانية للمنظومة ($\omega=\Omega$).

التحليل النظري

تم بناء أنموذج للمنظومة الغازية بأبعادها الثلاثة وباستخدام طريقة المصفوفات الانتقالية المعتمدة في هذا البحث، والتي تقوم على أساس تقسيم النظام الى كتل منتظمة تمتلك خواص عزم القصور الذاتي للاسطوانات دائرية المقطع صلدة، متصلة بأعمدة مهملة الوزن وذات مساحة مقطع ثابتة وسلوك تلك الأعمدة تبنى وفق صيغة انحناء اويلر وقوى قص تيموشنكو(Timoshenko). حيث تعبر عن مقاطع النظام من خلال مصفوفة المجال (Field Matrix) (مصفوفة عناصر العتبة) [F] التي لها علاقة بمتجهات الحالة (State Vector) عند نهايات أي مقطع من النظام، وكل محطة بالمنظومة تمتلك مصفوفة نقطة (مصفوفة عنصر الكتلة) [P] والتي لها علاقة بمتجهات الحالة عند يمين ويسار أي محطة (i) وكما يوضحه الشكل (3).



شكل (3) نموذج يوضح الطريقة المستخدمة في التحليل لجزء من منظومة غازية

متجه الحالة (State Vector)

متجه الحالة لنقطة معينة (i) للمنظومة هو متجه يتكون من ازاحات النقطة (i) والقوة الداخلية عند تلك النقطة ولكل محطة (Station) يوجد متجهان إحداهما على يمين المحطة ويرمز له بـ $[\overline{Z}]_i^R$ والأخر على يسارها ويرمز له بـ $[\overline{Z}]_i^L$ ويعرف متجه الحالة لحسابات ثلاثية الأبعاد كما يلي:

$$[\overline{Z}]_i = [\overline{x}\ \overline{y}\ \overline{\theta}_z\ \overline{\theta}_x\ \overline{\theta}_y\ \overline{M}_z\ \overline{M}_x\ \overline{M}_y\ \overline{V}_z\ \overline{V}_x\ \overline{V}_y\ 1]^T \quad \ldots (11)$$

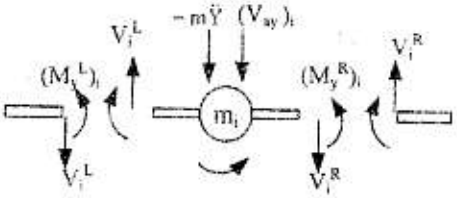
مصفوفة النقطة (مصفوفة عنصر الكتلة) (Point Matrix)

تسمى المصفوفة التي تربط بين متجهات الحالة لمحطة معينة بمصفوفة النقطة. وبصورة عامة، توجد ثلاث حالات من مصفوفة النقطة المأخوذة بنظر الاعتبار في البحث الحالي، والتي تغطي جميع الإمكانيات المترتبة عند أي محطة وعلى طول النظام،[7]، [8]، وهذه الحالات هي:

١. كتلة مجمعة (Lumped Mass)عند تلك المحطة.
٢. مواقع كراسي التحميل.
٣. مواقع التفرع (التي تمثلها الأنصال المتحركة على طول العمود الدوار).

الحالة (1) عنصر كتلة مجمعة عند المحطة (i)

يمثل الشكل(4) مخطط لكتلة نقطيه مبيناً عليها العزوم والقوى المؤثرة على يمينها و يسارها عند المحطة (i).بالأضافة الى وجود التأثير الجايروسكوبي على تلك المحطة، ومن الشكل نجد أن معادلات الاتزان للكتلة (m_i) في المستوي (xz) كما يأتي:



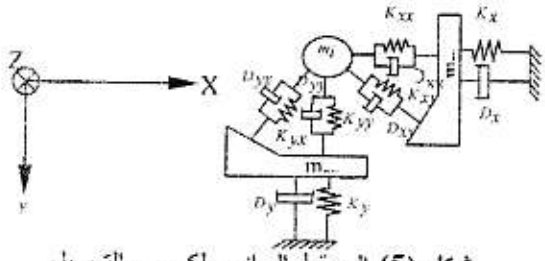
شكل (4) مخطط جسم حر لكتلة (m_i) في اتجاه محور Y

الصيغة العامة لمصفوفة النقطة تكون بالشكل التالي:

$$\{\overline{Z}\}_i^R = [\overline{P}]_i \{\overline{Z}\}_i^L \quad \ldots (12)$$

الحالة (2) موقع كرسي تحميل عند المحطة (i)

في هذه الحالة، تفترض خلال التحليل تركيب ساند لكرسي تحميل ذو انثنائية. وتضمنت الحالة تأثير كل من العزم الجايروسكوبي، حمل نقطة، وتأثير قوى عدم الموازنة .يوضح الشكل (5) معاملات المرونة والتخميد لكل من كرسي التحميل والتركيب الساند في المستوي (Y X).[7]



شكل (5) المسقط الجانبي لكرسي التحميل

من خلال الشكل أعلاه يمكن التوصل الى فرق قوى القص على يمين ويسار المحطة (i) وبالصيغة التالية.

$$\begin{bmatrix} R_x \\ R_y \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} -xx & -xy \\ -yx & -yy \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} \omega^2 \rho x \cdot XX & -xy \\ -yx & \omega^2 \rho y \cdot yy \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} \omega^2 \cdot \rho ax \cdot a^2 x \\ \omega^2 \cdot \rho ay \cdot a^2 y \end{bmatrix}_i \quad \ldots (13)$$

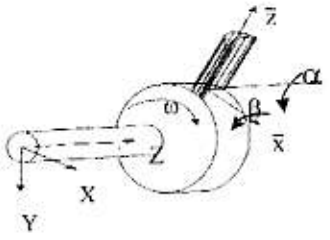
الحالة (3) موقع التفرع للأنصال

في هذه الحالة، تفترض وجود تراكيب متناظرة (الأنصال) لقرص العمود الدوار، حيث تتمذج هذه التراكيب بتوزيع عناصر الكتلة بصورة متناسقة لمقاطع الأنصال وتعتبر كفرع من النظام الرئيسي، لذلك فمصفوفة النقطة يجب أن تأخذ بالحسبان تأثير عناصر التفرع بالاضافة الى التاثيرات الجايروسكوبية وتأثير قوى القص والحمل المنتشر على طول الأنصال والناتجة من تأثير ضغط الغاز، حيث يتم اختزال عناصر مصفوفة الفرع الى مصفوفة فردية تأخذ تأثير العزم الجايروسكوبي بالإضافة الى تأثير العزوم وقوى القص الداخلية على مصفوفة النقطة في النظام الرئيسي، وبسبب تأثير العزوم الجايروسكوبية على نظام التفرع (الأنصال المتحركة) والاختلاف بين قيم خواص كتلة العنصر (i) (عزم القصور الذاتي الدوراني) لمصفوفة النقطة باتجاه محاور النظام، لذلك يتم إعادة كتابة المعادلة (2) بالصيغة التالية:

$$[\overline{M}_i] = -\Omega^2 [I_o]_i [\overline{\phi}_i] - [M_a]_i \quad \ldots (14)$$

يتم نقل مصفوفة عزم القصور الذاتي بين محاور المنظومة للجسم الحر باتجاه إحداثيات النظام الرئيسي والمبين في الشكل (5).

$$[\overline{I}_i] = [\overline{R}]\,[I_o]\,[\overline{R}]^T \quad \ldots (15)$$



شكل (6) نموذج لإحداثيات النظام (النصل مع العمود الدوار)

وبشكل عام تعرّف مصفوفة التحويل $[R]$ ، التي تحول إحداثيات النصل من أي موقع الى إحداثيات النظام الرئيسي [9]. حيث γ, β, α تمثل زوايا النظام الرئيسي، وعندما تكون $\gamma = 0, \beta = 90$ و $\alpha = (\alpha + \omega t)$ نحصل على مصفوفة التحويل $[\overline{R}]$.

$$[R] = \begin{bmatrix} 0 & \sin(\alpha+\omega t) & \cos(\alpha+\omega t) \\ 0 & \cos(\alpha+\omega t) & -\sin(\alpha+\omega t) \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \ldots (16)$$

يتم الحصول على المصفوفة (مصفوفة الضرب النهائية) لنظام الفرع ولنصل واحد فقط بأجراء عملية الضرب المستمر لمصفوفات النقطة والمجال للنصل، وتمثل المصفوفة الناتجة من عملية الضرب العلاقة بين النهاية الحرة للفرع والنهاية المثبتة بقرص العمود الدوار وكما موضح بالشكل (7)، ويعبر عنها بمعادلة المصفوفة على النحو الآتي:

$$\begin{bmatrix} Q \\ R \\ 1 \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} U_{VV} & U_{VP} & U_V \\ U_{PV} & U_{PP} & U_P \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ R \\ 1 \end{bmatrix}^o \quad \ldots (17)$$

$$Q = \{Z, X, Y, \phi_Z, \phi_X, \phi_Y\}$$

$$R = \{V_Z, V_X, V_Y, M_Z, M_X, M_Y\}$$

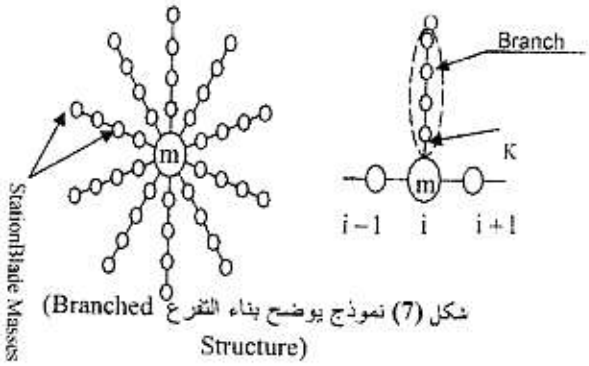
$U_{VV}, U_{VP}, U_{PV}, U_{PP}$ هي مصفوفات (6×6) التي تمثل العناصر للمصفوفة الانتقالية للتفرع.

U_V & U_P تمثل عناصر العمود من المعادلة (13) المصفوفة الانتقالية للتفرع ومتجه هذه المصفوفات ذات بعد (6×1).

وبعد تعويض الشرط الحدي $(R=0)$ (أي قيم قوى القص و العزوم تساوي صفراً عند النهاية الحرة للنصل) نحصل على المتجه (R^k) ولنصل واحد فقط وترتيب المعادلة (17)، نحصل على:

$$R^k = U_P U_V^{-1} Q^o - U_P U_V^{-1} U_V + U_P \quad \ldots (18)$$

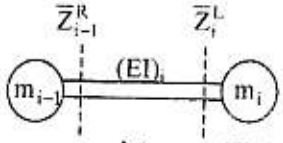
وللحصول على المصفوفة المفترضة للنظام الفرعي بأكمله يتم بعملية جمع المتجهات لكل نصل والحصول على المتجه الكلي (R_t^k) بعد أجراء عملية نقله الى محاور النظام الرئيسي، ويؤخذ تأثيرها على مصفوفة النقطة في النظام الرئيسي من خلال عملية طرح متجه نظام التفرع (R_t^k) من متجه مصفوفة النقطة في النظام الرئيسي [13].



شكل (7) نموذج يوضح بناء التفرع (Branched Structure)

مصفوفة المجال (Filed Matrix)

في اغلب الأحيان يتصل عنصر المقطع المهمل الوزن من نهايته بكتلتين مجتمعتين كما في الشكل (8).تسمى المصفوفة التي تربط بين متجه الحالة الأيمن (m_i) ومتجه الحالة الأيسر للكتلة (m_i) بمصفوفة المجال ويعبر عنها بالمعادلة التالية [8]، [9]:



شكل(8) يبين مقطع من عمود دوار

$$\{\overline{Z}\}^L_i = [\overline{F}]_i \{\overline{Z}\}^R_{i-1} \quad \ldots (19)$$

اختزال متجهات الحالة الوسطية (Elimination of Intermediate State Vector)

لتوضيح عملية الاختزال نأخذ الشكل (3)، حيث يمكن ايجاد متجه الحالة عند المحطة (n) بدلالة متجه الحالة عند الحد $\{Z\}^L_1$ بالصيغة التالية: [8]، [9]

$$\{Z\}^R_n = [F]_n [F]_{n-1} [F]_{n-1} [F]_{n-2} [F]_{n-2} \ldots [F]_2 [F]_2 [F]_1 [F]_1 \{Z\}^L_1 \quad \ldots (20)$$

أو

$$\{Z\}^R_n = [B]_n \{Z\}^L_1$$

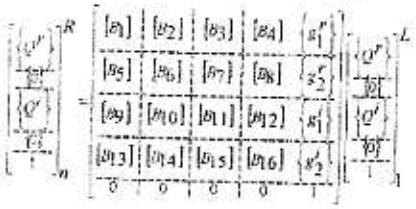
حيث أن $[B]_n$ مصفوفة النظام الكلي والتي تمتلك بعد (25x25) والبعد لنهاية المتجهين $\{Z\}^L_1$ و $\{Z\}^R_n$ هو (25x1) على التوالي.

الشروط الحدية وحساب السرع الحرجة

استجابة النظام سوف تحسب عند جميع المحطات تحت الشروط التالية:

قيم قوى القص وعزوم الانحناء في الاتجاهات الثلاث Z ,Y, X عند النهاية الحرة للنظام تساوي صفر،

وبتطبيق هذه الشروط الحدية أعلاه عند النهايتين الحرتين لمتجهين الحالة تنتج،



$$\ldots (21)$$

$$\{T\} = [AM]^{-1} \{G\} \quad \ldots (22)$$

تمثل المعادلة (22) [8]حساب المقادير الجانبية المجهولة لمتجه الحالة عند النهاية الحرة للنظام، وبمجرد معرفة هذه المقادير يكون قد علم لدينا متجه الحالة الطرفي، ويمكن حساب الازاحات والقوى الداخلية على طول النظام (وبضمنها النظام الفرعي) من خلال عملية الضرب المستمر لمصفوفات النقطة والمجال الانتقالية.

النتائج والمناقشة

تم مناقشة النتائج التي تم الحصول عليها بمساعدة البرنامج المعد لأحتضان الجانب النظري وعلى النحو التالي :

فقدان نسبة من كتلة النصل:

تم دراسة تأثير فقدان جزء أو بصورة كاملة من إحدى أنصال منظومة توربينية– ضاغطة وبدون تأثير توزيع القوى والعزوم الخارجية على طول سطح النصل وملاحظة استجابتها، حيث تمت الدراسة على أنصال المرحلة الثانية للتوربين الغازي ذو (20) نصل وأفترض وجود عدم أتزان والموضح في جدول (1).

جدول (1) يبين النسب المئوية المفترضة لخسارة جزء من نصل مع كتلتها وأطوالها

Fraction of Blade Losses	Mass Losses (kg)	Length (m)
14%	0.277844	0.790989
47%	0.932762	0.763443
70%	1.389220	0.733104
100%	01.98460	0.705589
First & Third	03.96920	0.675063

الجدول (2) يبين النسب المئوية المفترضة وسرعها الحرجة الثلاث التي تم أحتسابها، إذ بزيادة الجزء المفقود من نصل المرحلة الثانية يؤدي الى زيادة السرع الحرجة ويعتمد مقدار هذه الزيادة على درجة السرعة الحرجة والنسبة المئوية المفترضة وقد يعود

السبب في ذلك الى زيادة قوى عدم الاتزان وارتفاع قوى القص وعزم الانحناء التي تؤثر على قيم الميل و السعات الاهتزازية والشكل(10) يوضح ذلك، وكذلك يلاحظ من الجدول بأن أقصى قيم لسعات الاهتزاز تزداد بزيادة الكتل المفقودة والشكل(9) يوضح ذلك.

جدول (2) يبين النسب المئوية المفترضة وأقصى سعة اهتزاز عند السرع الحرجة

Fraction of Blade Lost	السرعة الحرجة الأولى		السرعة الحرجة الثانية		السرعة الحرجة الثالثة	
	N1 p.r	mplitud (mm)	N2 p.r	mplitud (mm)	N3 (r.p.m)	mplitud (mm)
14%	5056	0.1492	8090	0.03336	12790	0.1548
47%	5057	0.3990	8124	0.08470	12800	0.3445
70%	5058	0.5659	8130	0.12129	12802	0.4713
100%	5060	1.0664	8136	0.23248	12806	0.8519
First &Thir	5061	1.8637	8142	0.40294	12808	1.4597

الشكل (11) يبين توزيع عزم الانحناء على طول النصل الواحد ولسرع دورانية مختلفة وبفقدان نصل واحد ونصلين، إذ يلاحظ أنه بزيادة عدد الأنصال المفقودة تؤدي الى زيادة قيم عزم الانحناء وقوى القص على طول النصل. أما شكل الطور الاهتزازي فيتضح من الشكل (12) بأنه لا يتأثر بفقدان أجزاء من النصل.

تغير زاويا دخول وخروج النصل والمائع :

دراسة تأثير تغير الزوايا التصميمية للدخول وخروج المائع والنصل عند متوسط نصف القطر، حيث تمت الدراسة على نصل المرحلة الثانية للتوربين الغازي. أفترض وجود عدم أتزان عند التقاء النظام الرئيسي والتفرع مقداره (0.0853 kg.m) وبزاوية طور (0^0).

تم اخذ حالتين من الزوايا التصميمية عند متوسط نصف القطر هي:

١. زاوية دخول وخروج الغاز من و الى المرحلة هي ($\alpha_2=58.383^o$)، ($\alpha_3=10^o$) على التوالي وزاوية دخول وخروج النصل هي ($\beta_2=20.483^o$)، ($\beta_3=54.95^o$) على التوالي [10].

٢. زاوية دخول وخروج الغاز من والى المرحلة هي ($\alpha_2=72.05^o$)، ($\alpha_3=30.09^o$) على التوالي وزاوية دخول وخروج النصل هي ($\beta_2=43.4^o$)، ($\beta_3=66.54^o$) على التوالي [11].

الجدول (3) يبين تغير الزوايا التصميمية وأقصى سعة اهتزاز عند السرع الحرجة، إذ يلاحظ من الشكل(13) أن قيم السعات الاهتزازية تزداد عند تغير الزوايا التصميمية لدخول وخروج الغاز والنصل والشكل (14) يبين توزيع قيم السعات الاهتزازية بأبعادها الثلاث على طول العمود الدوار لمدى من السرع الدورانية ولحالة تغير الزوايا التصميمية، حيث نلاحظ زيادة هذه القيم عند زيادة القوى الخارجية على طول سطح النصل. الشكل (15) يوضح توزيع عزم الانحناء على طول النصل ولحالتين من الزوايا، إذ يلاحظ زيادة عزم الانحناء عند زيادة القوى الخارجية.أما الشكل (16) يبين تأثير تغير الزوايا على قيم توزيع المقادير الجانبية للاهتزاز حيث بتغير الزوايا يؤدي الى تزحيف هذه القيم الى سرع أعلى من سرعة الدوران،وعدم تأثيرها على شكل الطور الاهتزازي .

جدول (3) يبن تغير الزوايا التصميمية وأقصى سعة اهتزاز عند السرع الحرجة

Design Angl	السرعة الحرجة الأولى		السرعة الحرجة الثانية		السرعة الحرجة الثالثة	
	N_1 p.r	mplitud (mm)	N_2 p.r	mplitud (mm)	N_3 p.r	mplitude (mm)
irst Angle	5056	3.1847	7820	0.3487	12780	1.1067
cond Angle	5050	3.6149	7820	0.3929	12780	1.2571

الأستنتاجات

١. أن زيادة الجزء المفقود من النصل الواحد يؤدي الى زيادة السرع الحرجة وقيم أقصى سعة اهتزاز على طول العمود الدوار وتعتمد هذه الزيادة على مرتبة السرعة الحرجة والنسب المئوية لفقدان كتلة النصل.

٢. تزداد قيم قوى القص وعزم الانحناء على طول النصل الواحد في ذات المرحلة بزيادة فقدان عدد الأنصال، كما لا يتأثر شكل الطور الاهتزازي للنظام بزيادة النسب المفقودة للأنصال عند مراتب السرع الحرجة.

٣. أن تغير الزوايا التصميمية للنصل تؤدي الى زيادة قيم السعات الاهتزازية عند مراتب السرع الحرجة ألا أنه لا يؤثر على تغير قيم السرع الحرجة، كما لا يؤثر عل شكل الطور الاهتزازي عند مراتب السرع الحرجة.

المصادر

1. H.A.Saleh," Investigation into the forced Vibration of Hollow Turbine Blade "

Performance of Crank Shaft Bearing System in a Diesel Engine", Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering, University of Technology , October 1996.

9. H.H. Priebsch et. Al. ;"Prediction Technique for Stress and Vibration of nonlinear Supported Rotating Crankshafts" Journal of Engineering for gas Turbine and Power, Vol.115, October, 1993, Page (711-720).
10. H.Cohen et. al. ;"Gas Turbine Theory",Printed by Longman Group Ltd., London, UK,1981,Page(182-224).
11. M.Arai et. al ;"Research and Development on the HPT of the 100B", Journal of Engineering for gas Turbine and Power, Vol.110,April,1988.
12. Thomson, William T.;"Theory of Vibration with Application ",University of California, Hyman Ltd., London,1988.

قائمة الرموز

الرمز	المعنى	الوحدة
$[\bar{F}]$	مصفوفة المجال المعقدة	
$[\bar{P}]$	مصفوفة النقطة المعقدة	
m_i	كتلة النقطة (i)	kg
$\dot{m}_g$	معدل تدفق الغاز	kg / s
$\{\bar{z}\}$	متجه الحالة	
r_m	متوسط نصف القطر	m
F_y	القوة المماسية	N
F_x	القوة المحورية	N
α_{2m} ، α_{3m}	زاوية دخول وخروج الغاز عند متوسط نصف القطر	degree
β_{2m} ، β_{3m}	زاوية دخول وخروج	degree

M.sc.thesis,University of Baghdad, College of Engineering,October 1979.

2. J.A.Fabunmi J. A.,"Forced Vibration of aSingle Stage Axial Compressor Rotor ,"Journal of Engineering for Power, Vol. 102, No.2,Page (322-328),April ,1980.
3. M.Sakata et. Al.,"Transient Vibration of High –Speed ,Lightweight Rotors Due to Sudden Imbalance", Journal of Engineering for Power ,Vol.105 ,No .3,Page (480-486),July ,1983.
4. Kaushal ,AShock ,"Comprehensive Dynamic Analysis of A Bladed Disk – Turborotor –Bearing System (Turborotor) ",DAI-B 53/12, Page (6506),Jun ,1993.
5. N.F. Rieger Shixiang Zohu ,"Development and Verification of Transfer Matrix Unbalance Response Procedure for Three-Level Rotor – Foundation Systems ,"Journal Vibration and Acoustic ,Vol .120,Page (240-251),January ,1998.
6. N.F.Rieger Shixiang Zhou ,"AInstability Analysis Procedure for Three- Level Multi-Bearing Rotor – Foundation System ",Journal Vibration and Acoustic ,Vol .120,page (753-762),July ,1998.
7. M.A. Tawfik, "Lateral Vibration of Branched Systems in Particulur Vertical Machines ,"M,Sc. Thesis ,Cranfield Institute of technology ,1987.
8. M.A. Tawfik , "The Effect of Misalignment on the Dynamic Performance of Shaft Bearing System in Dynamic

الرمز	المعنى	الوحدة
	النصل عند متوسط نصف القطر	
Z, Y, X	الانحرافات في الاتجاهات z , y , x على الترتيب	m
ϕ_z, ϕ_y, ϕ_x	زوايا الميل حول z , y , x على الترتيب	degree
V_z, V_y, V_x	مركبات قوى القص في الاتجاهات z,y,x على الترتيب	N
M_z, M_y, M_x	مركبات عزوم الانحناء في الاتجاهات z,y,x على الترتيب	N.m
C_2, C_3	السرعة المطلقة لخروج ودخول الغاز على الترتيب	m/s
V_2, V_3	السرع النسبية لخروج ودخول الغاز	m/s
I_z, I_y, I_x	عزم القصور الذاتي للكتلة باتجاه z,y,x على الترتيب	kg.m^2
j	$\sqrt{-1}$	
V_{ax}, V_{ay}, V_{az}	قوى القص الخارجية باتجاه x , y , z على الترتيب	N
M_{ax}, M_{ay}, M_{az}	عزوم الانحناء الخارجية باتجاه x , y , z على الترتيب	N.m
ω_i	السرعة الدورانية	r.p.m
Ω_i	السرعة التدويمية	r.p.m
U_x^*, U_y^*	مركبات عدم الموازنة للعمود الدوار في الاتجاهات x , y على الترتيب	kg.m
τ_A	العزم المسلط في الضاغط	N.m
τ_o	العزم الخارج من التوربين	N.m

الرمز	المعنى	الوحدة
Z, Y, X	الانحرافات في الاتجاهات z , y , x على الترتيب	m
ϕ_z, ϕ_y, ϕ_x	زوايا الميل حول z , y , x على الترتيب	degree
V_z, V_y, V_x	مركبات قوى القص في الاتجاهات z,y,x على الترتيب	N
M_z, M_y, M_x	مركبات عزوم الانحناء في الاتجاهات z,y,x على الترتيب	N.m
C_2, C_3	السرعة المطلقة لخروج ودخول الغاز على الترتيب	m/s
V_2, V_3	السرع النسبية لخروج ودخول الغاز	m/s
I_z, I_y, I_x	عزم القصور الذاتي للكتلة باتجاه z,y,x على الترتيب	kg.m^2
j	$\sqrt{-1}$	
V_{ax}, V_{ay}, V_{az}	قوى القص الخارجية باتجاه x , y , z على الترتيب	N
M_{ax}, M_{ay}, M_{az}	عزوم الانحناء الخارجية باتجاه x , y , z على الترتيب	N.m
ω_i	السرعة الدورانية	r.p.m
Ω_i	السرعة التدويمية	r.p.m
U_x^*, U_y^*	مركبات عدم الموازنة للعمود الدوار في الاتجاهات x , y على الترتيب	kg.m
τ_A	العزم المسلط في الضاغط	N.m
τ_o	العزم الخارج من التوربين	N.m

الرمز	المعنى	الوحدة
D_{xx} , D_{xy}	معاملات تخميد كرسي	(N.s/m)
D_{yx} , D_{yy}	التحميل	
D_x , D_y	معاملات تخميد مسند كرسي التحميل	(N.s/m)
K_{xx} , K_{xy}	معاملات صلابة كرسي	N/m
K_{yx} , K_{yy}	التحميل	
K_x , K_y	معاملات صلابة قاعدة مسند كرسي التحميل	N/m
m_{py} , m_{px}	كتل قاعدة المسند في اتجاه y,x على الترتيب	kg

الرموز العلوية

L	يشير إلى أن المقدار أو المتجه يقع على يسار المحطة
R	يشير إلى أن المقدار أو المتجه يقع على يمين المحطة

الرموز السفلية

i	يشير إلى عدد المحطات للنظام
x, y, z	تشير إلى المتغيرات في الاتجاهات x ,y ,z.
a	تشير إلى المتغيرات الخارجية.

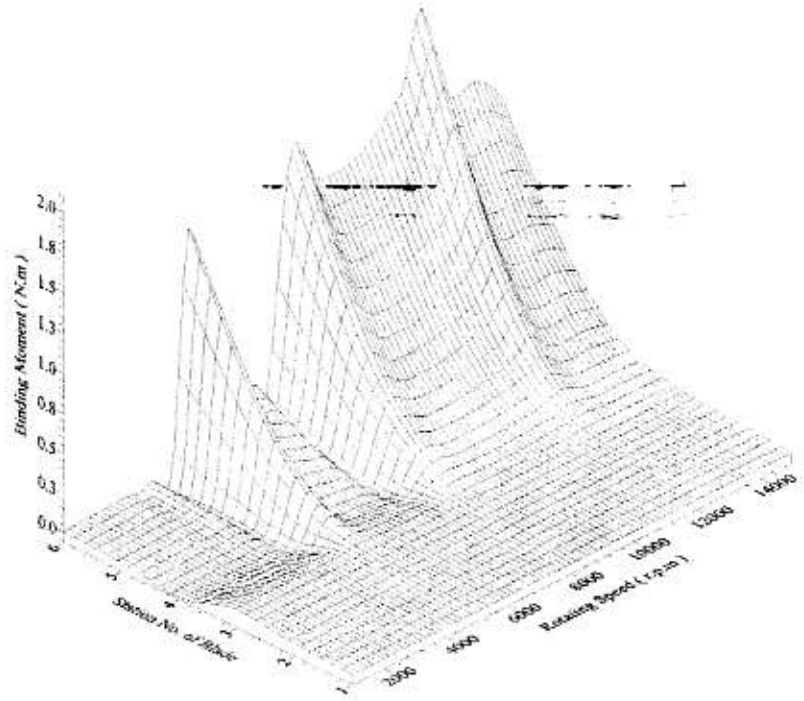
(a) فقدان نسبة 47% من النصل الأول

(b) فقدان نسبة ٧٠% من النصل الأول

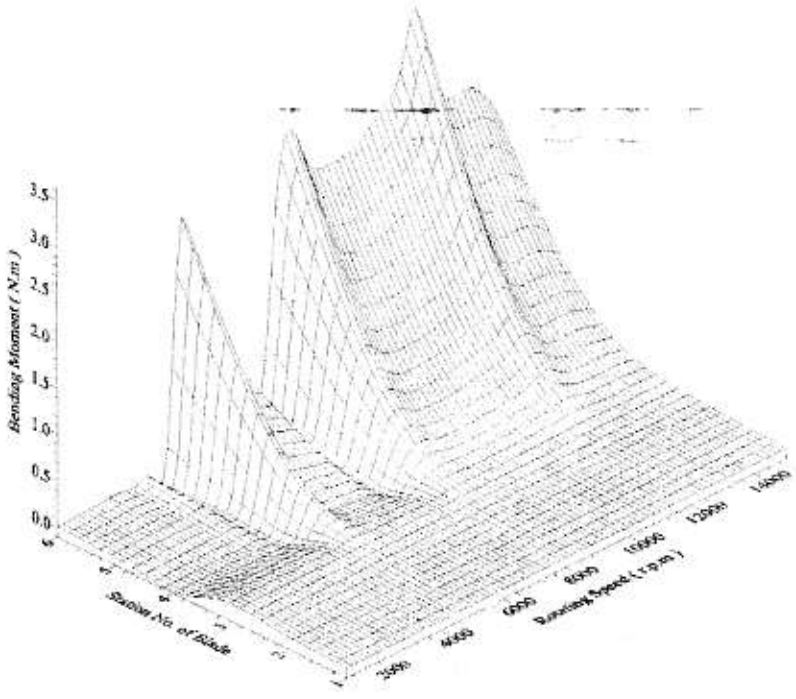
(c) فقدان النصل الأول بأكمله

(d) فقدان النصلين الأول والثالث

شكل (10) توزيع السعات الاهتزازية على طول العمود الدوار لمدى من السرع الدورانية ولحالات مختارة من نسب فقدان كتلة نصل

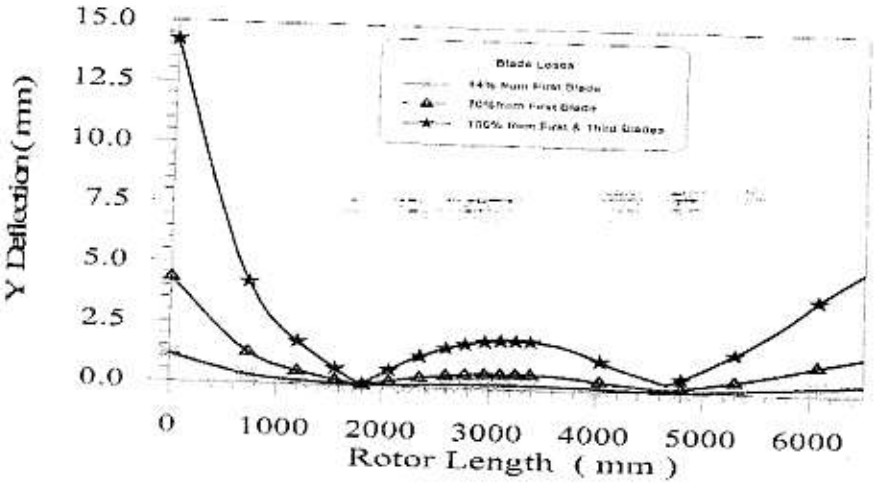


(a)فقدان نصل واحد.

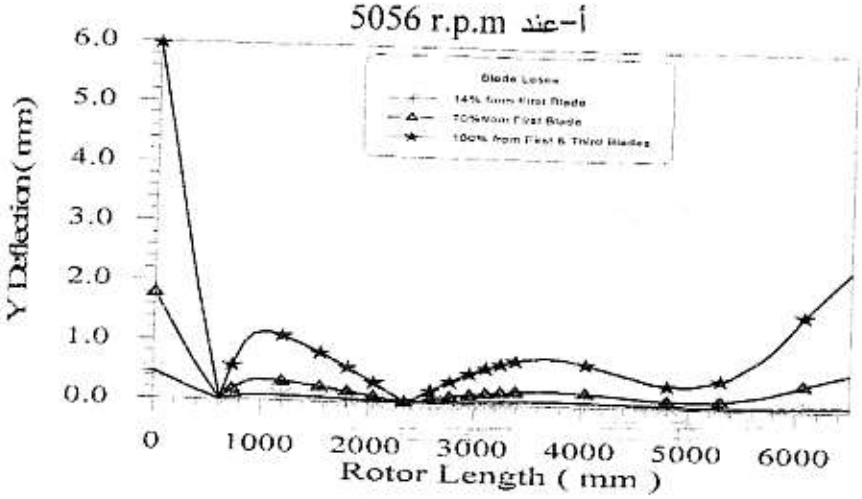


(b) فقدان نصلين.

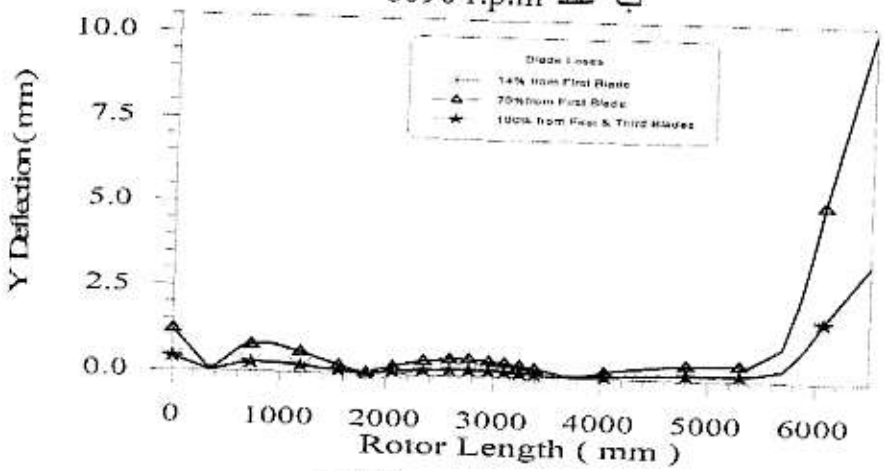
شكل(11) توزيع عزم الانحناء على طول النصل الواحد ولسرع دورانية مختلفة وبفقدان نصل واحد ونصلين



أ-عند 5056 r.p.m

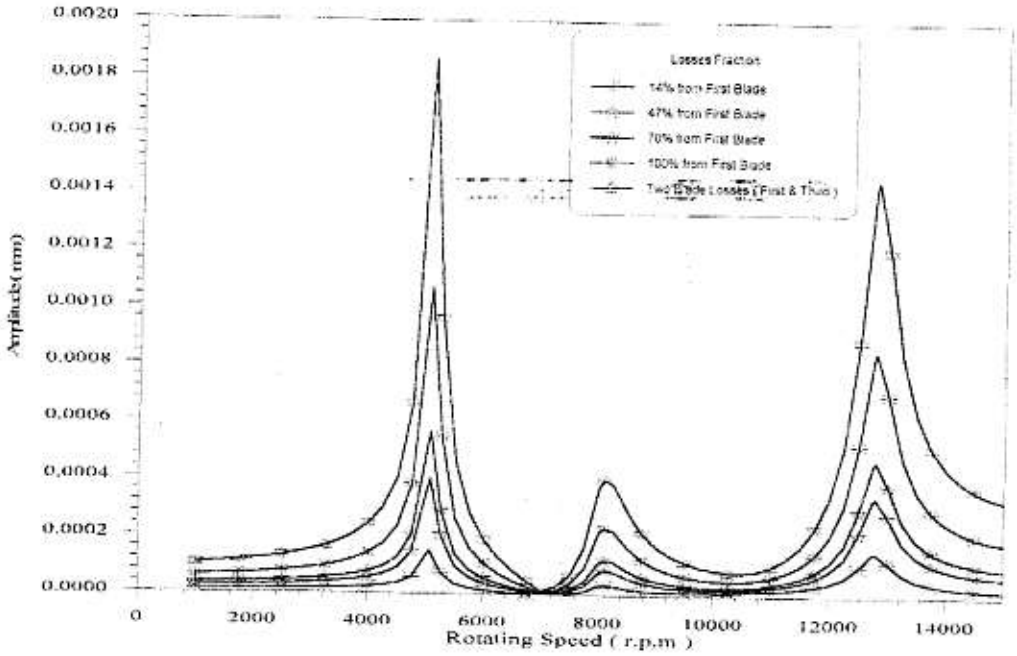


ب-عند 8090 r.p.m

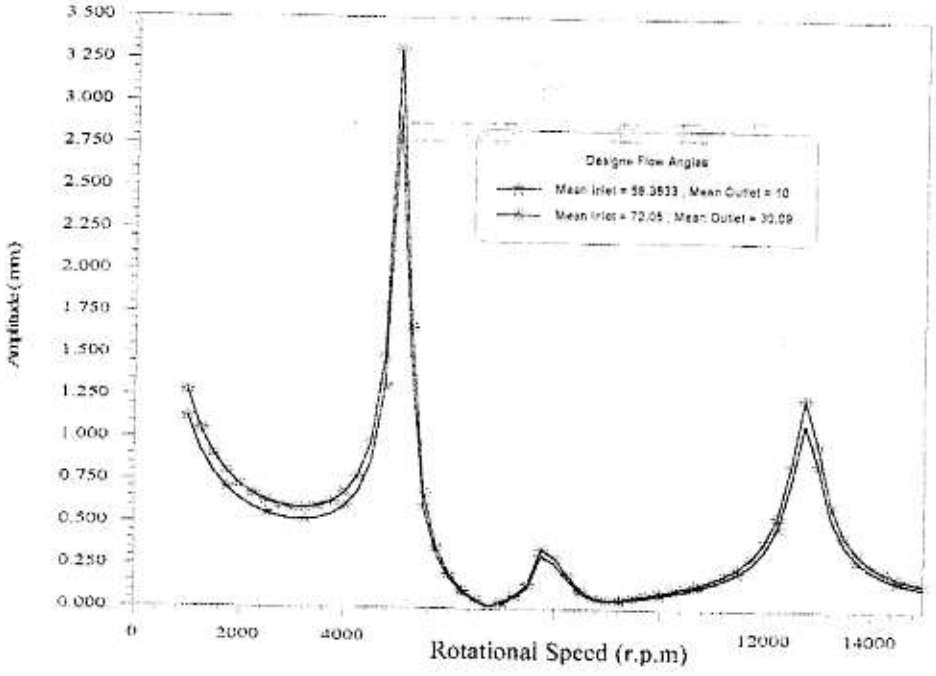


ج-عند 12790 r.p.m

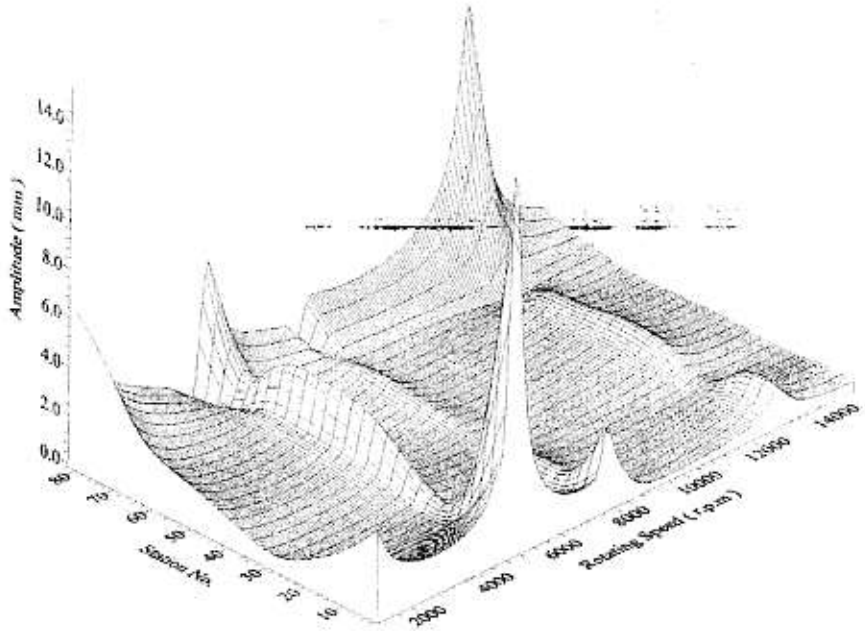
شكل (12) توزيع السعات الاهتزازية على طول العمود الدوار عند السرع الحرجة ولثلاث حالات مختارة من نسبة فقدان نصل



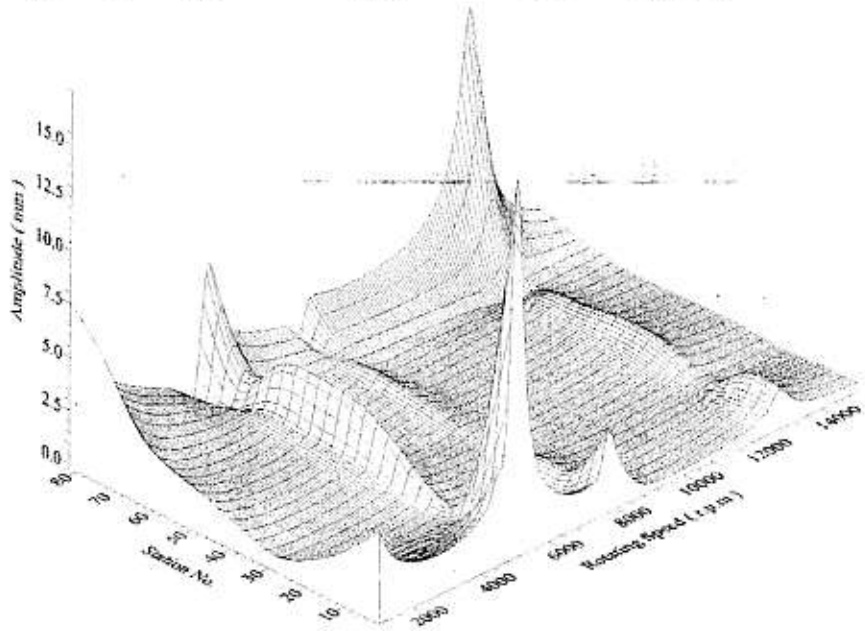
شكل(9) تأثير فقدان نسب من كتلة النصل على الاستجابة الديناميه للنظام



شكل (13) تأثير تغير الزوايا التصميمية على الاستجابة الديناميه للنظام

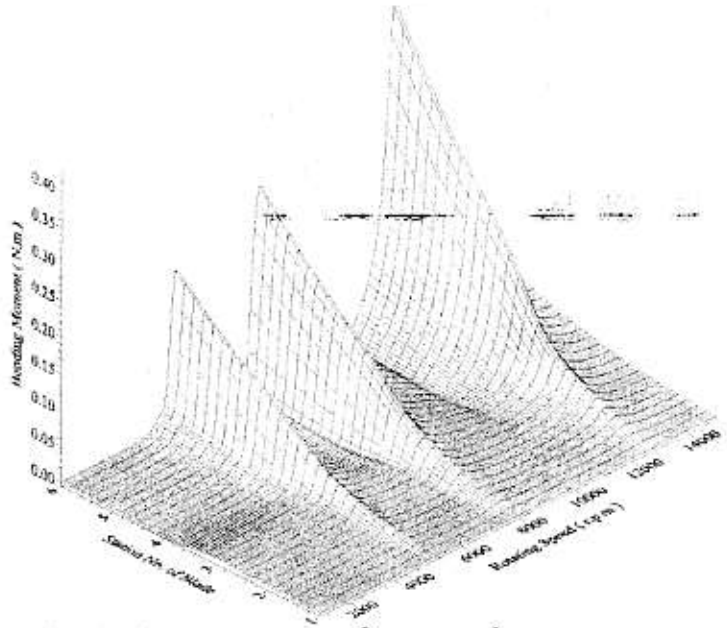


(a) زوايا دخول وخروج المائع ($\alpha_3=58.3833^0$, $\alpha_2=10^0$) على التوالي وزوايا دخول وخروج النصل ($\beta_3=54.95^0$, $\beta_2=20.483^0$) على التوالي

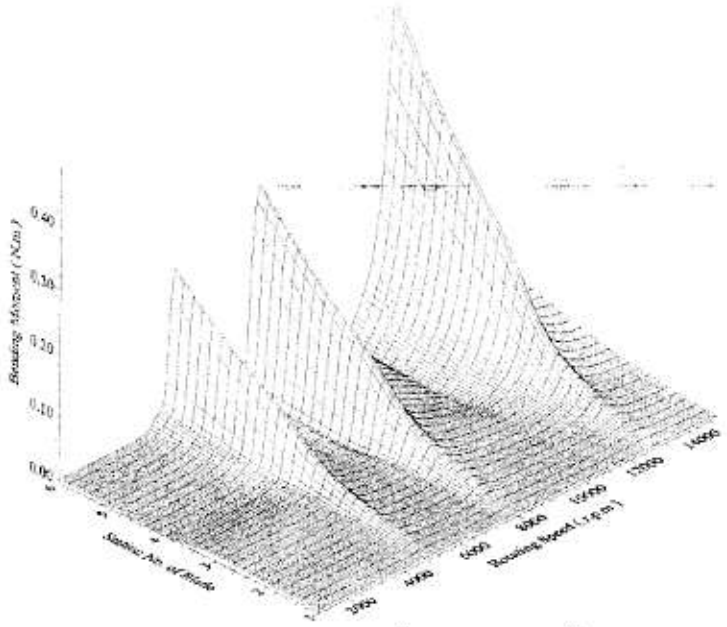


(b) زوايا دخول وخروج المائع ($\alpha_3=72.05^0$, $\alpha_2=30.09^0$) على التوالي وزوايا دخول وخروج النصل ($\beta_3=66.54^0$, $\beta_2=43.4^0$) على التوالي

شكل (14) توزيع السعات الاهتزازية على طول العمود الدوار لمدى من السرع الدورانية ولحالتين من الزوايا التصميمية

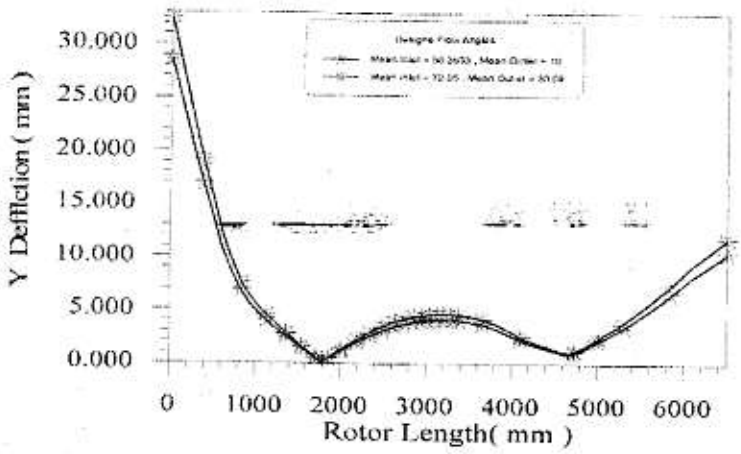


(a) زوايا دخول وخروج المائع ($\alpha_3=58.3833^0$, $\alpha_2=10^0$) على التوالي وزوايا دخول وخروج النصل ($\beta_3=54.95^0$, $\beta_2=20.483^0$) على التوالي

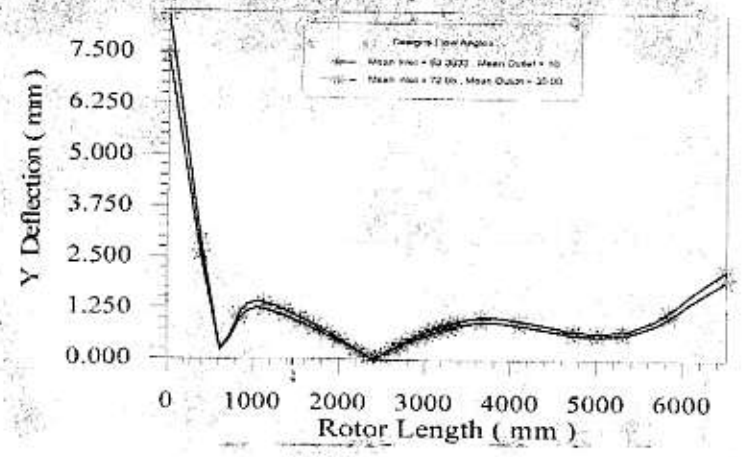


(b) زوايا دخول وخروج المائع ($\alpha_3=72.05^0$, $\alpha_2=30.09^0$) على التوالي وزوايا دخول وخروج النصل ($\beta_3=66.54^0$, $\beta_2=43.4^0$) على التوالي

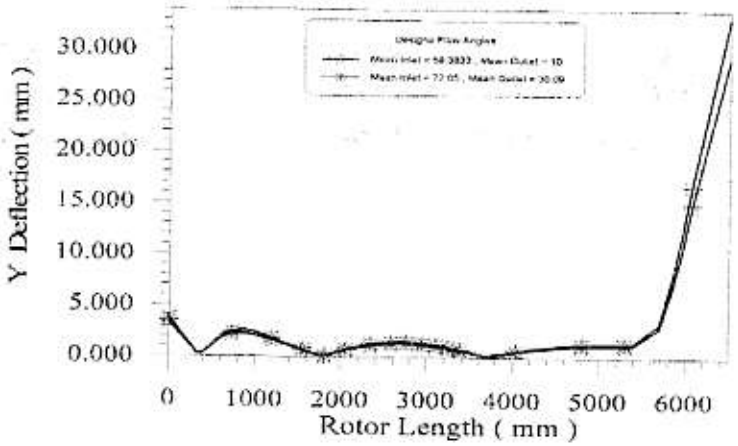
شكل (15) توزيع عزم الانحناء على طول النصل لمدى من السرع الدورانية ولحالتين من الزوايا التصميمية



أ-عند 5050 r.p.m



ب-عند 7820 r.p.m



ج-عند 12780 r.p.m

شكل (16) توزيع السعات الاهتزازية على طول العمود الدوار عند السرع الحرجة ولحالتين من الزوايا التصميمية